

Efek Perbedaan Jumlah dan Material *Tube* pada Distribusi Temperatur *Tube Heat Exchanger* dalam Kompor (Studi Kasus di Industri Tempe Kecamatan Tenggilis Mejoyo Surabaya)

I P. Angga Kristyawan, Ridho Hantoro dan Gunawan Nugroho
Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: hantoro@ep.its.ac.id

Abstrak—Pemakaian *heat exchanger* pada kompor industri tempe di kelurahan Tenggilis Mejoyo Surabaya mengaplikasikan *tube heat exchanger* dengan jumlah *tube* 4 dan material tembaga. Pada pemakaian awal mampu memperlama penggunaan bahan bakar hingga 3 hari. Proses produksi *heat exchanger* memerlukan biaya hingga 2,5 juta rupiah. Untuk dapat mengatasi masalah tersebut maka dilakukan penelitian tentang performansi *heat exchanger* dengan memvariasikan material dan jumlah *tube*. Masalah ini disimulasikan dengan *computational fluid dynamics*. Simulasi dilakukan pada jumlah *grid* 388149 dan model turbulensi *RNG k-ε* dengan nilai deviasi terhadap temperatur ukur sebesar 1,0%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa performansi dengan jumlah *tube* 6 dan material besi memiliki performansi yang hanya berbeda sebesar 2395,188 Watt dan nilai temperatur keluaran hanya berbeda 2,338 K dengan 4 *tube* tembaga. Nilai investasi 6 *tube* besi juga lebih rendah dibandingkan dengan 4 *tube* tembaga senilai Rp 4.335.866,00 dan perbedaan nilai *payback period* hingga 4,22 bulan.

Kata Kunci—*preheater*, *heat exchanger*, *performansi*, *payback period*

I. PENDAHULUAN

APLIKASI *heat exchanger* sebagai pemanas air dalam kompor di industri tempe sangatlah bermanfaat. Uji coba awal pada pemakaian kompor mendapatkan tanggapan positif dari produsen tempe. Pemanas ini menurut pemakaian produsen selama 1 minggu pertama mengakibatkan proses pembuatan tempe lebih cepat. Proses perebusan menjadi lebih cepat panas, dari 2 jam menjadi hanya 1 jam 15 menit. Bahan bakar kayu yang digunakan juga mengalami penghematan yang biasanya dibutuhkan 50 kg/5 hari saat menggunakan sistem ini 50 kg kayu dapat digunakan selama 8 hari. Tempe yang dihasilkan juga lebih matang, karena dalam perebusannya suhu air tetap dijaga dengan baik. Namun penggunaan bahan tembaga sebagai *heat exchanger* memakan biaya yang tinggi. Biaya produksinya mencapai nilai 2,5 juta rupiah.

Karena mahalnya harga tembaga, maka diperlukan alternatif *heat exchanger*. Untuk dapat mengganti material tersebut, perlu dilakukannya tahapan riset terlebih dahulu. Penelitian terdahulu yang telah meneliti tentang material *tube* pada sistem *preheater* kompor tidak dapat ditemukan. Namun ada beberapa penelitian yang juga membahas topik yang sama mengenai *heat transfer* pada *tube heat exchanger*. Menurut penelitian [1] tentang pengaruh geometri pada *thermal*

hydraulic heat exchanger optimasi desain dapat dilakukan melalui geometrinya. Pada penelitian tersebut penambahan *fin pitch* dan sudut *louver* merupakan parameter utama untuk optimasi. Penambahan *fin* meningkatkan *surface area* dan mampu meningkatkan *heat transfer* pada *heat exchanger*.

Selain itu, pengaruh geometri juga telah diteliti [2] yang menyebutkan bahwa *heat transfer* dipengaruhi oleh *flow efficiency*. Sedangkan *flow efficiency* dipengaruhi oleh geometri terutama pada *reynolds number* yang rendah. Dari penelitian tersebut, maka *heat exchanger* yang digunakan dapat dioptimasi dari segi geometrinya dalam hal ini jumlah *tube*. Dengan demikian penggunaan material yang memiliki konduktivitas *thermal* lebih rendah dari tembaga dapat digunakan. Untuk mengetahui efek perubahan jumlah dan material pada *tube heat exchanger* pada distribusi temperatur sistem *preheater* maka dilakukanlah penelitian tugas akhir ini. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pengukuran terhadap performansi kompor yang telah ada, simulasi untuk mengetahui pengaruh perbedaan jumlah *tube* terhadap distribusi temperatur *heat exchanger*, simulasi untuk mengetahui pengaruh perbedaan material *tube* terhadap distribusi temperatur *heat exchanger*, dan menghitung performansi *tube heat exchanger* yang sudah ada dan hasil simulasi

II. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian utama terdiri atas dua langkah, langkah tersebut adalah perhitungan efisiensi kompor dan juga tahapan simulasi *heat exchanger* untuk menemukan nilai performansi dari variasi yang memungkinkan untuk mengganti *heat exchanger* tembaga dengan biaya investasi yang lebih rendah.

A. Efisiensi Kompor dan Performansi Heat exchanger

Panas yang dihasilkan bahan bakar sangat mempengaruhi efisiensi kompor. Efisiensi kompor merupakan perbandingan dari energi yang dimanfaatkan (Q_s) dengan energi yang dihasilkan bahan bakar (Q_b) [3] – [4].

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_b} \times 100\% \quad (1)$$

Untuk memudahkan analisa, maka ditentukan kontrol volume dari plan hanya pada heat exchanger saja. Kesetimbangan energi dalam kontrol volume adalah sebagai berikut

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + Z_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + Z_e \right) \quad (2)$$

Dimana	E_{cv}	=	energi konveksi (J)
	\dot{Q}_{cv}	=	laju aliran energi (W)
	\dot{W}_{cv}	=	laju usaha (W)
	\dot{m}_i	=	Laju aliran massa masuk (Kg/s)
	\dot{m}_e	=	Laju aliran massa keluar (Kg/s)
	h_i	=	head loss masuk (m)
	v_i	=	kecepatan aliran masuk (m/s ²)
	Z_i	=	tinggi aliran masuk (m)
	h_e	=	head loss keluar (m)
	v_e	=	kecepatan aliran keluar (m/s ²)
	Z_e	=	tinggi aliran keluar (m)

Sedangkan performansi *heat exchanger* dapat ditemukan dengan menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* dan *Effectivines-NTU* [5] – [6]. Dalam penelitian ini, menggunakan metode LMTD, mempertimbangkan data simulasi yang didapatkan. Persamaan tersebut adalah

$$q = UFA \frac{(T_s - T_{h,o}) - (T_s - T_{h,i})}{\ln \left[\frac{T_s - T_{h,o}}{T_s - T_{h,i}} \right]} \quad (3)$$

dimana U (Overall Heat Transfer Coefficient, J/m²K), A (Luasan, m²), F (Faktor koreksi LMTD), T_s (Temperatur dinding, K), $T_{h,o}$ (Temperatur air yang keluar *tube heat exchanger*, K), $T_{h,i}$ (Temperatur air yang masuk ke *tube heat exchanger*, K).

B. Payback Period

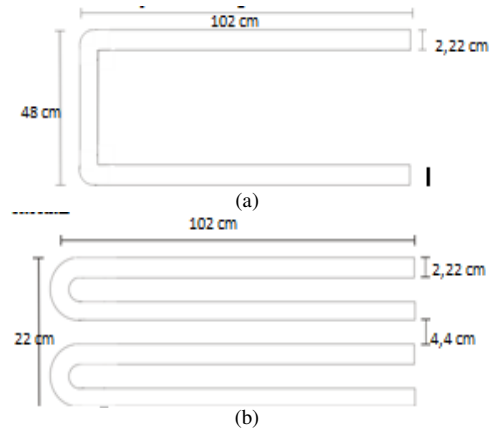
Penelitian yang dilakukan [7] menggunakan pay back period dalam menganalisa kelayakan dari pengubahan desain *Heat exchanger Network* pada sintesis metanol. Persamaan yang digunakan adalah

$$PBP = \frac{\text{Capital Investment}}{\text{Saving per year}} \quad (4)$$

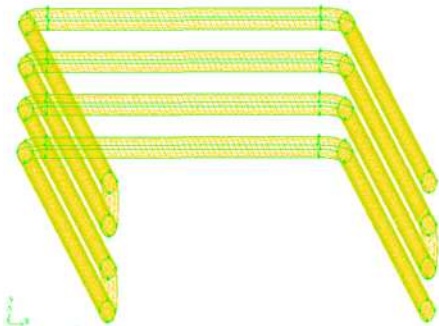
Dari hasil penelitian yang dilakukannya, perubahan *heat exchanger* dinilai dapat dilakukan karena hanya memerlukan *payback period* untuk investasi sebesar 0,4 tahun. Untuk itu dalam penelitian ini juga diperlukan analisa usaha menggunakan *payback period* agar hasil simulasi layak diterapkan.

C. Simulasi CFD

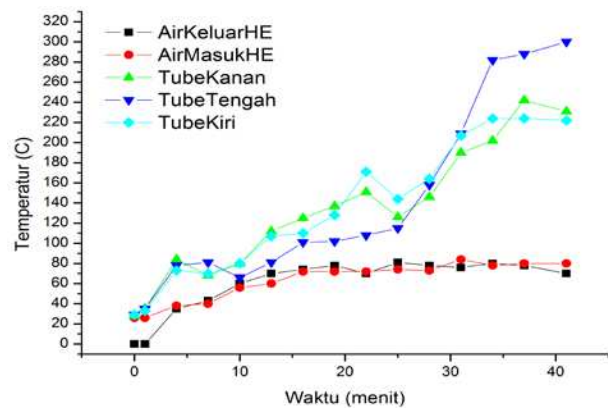
Tahapan simulasi CFD, terbagi menjadi 3 yaitu tahapan *preprocessing*, *solving* dan *postprocessing*.



Gambar 1. Geometri *Heat exchanger* (a) penampang horisontal dan (b) penampang vertikal



Gambar 2. Geometri *Heat exchanger* (a) penampang horisontal dan (b) penampang vertikal



Gambar 3. Data pengukuran temperatur terhadap waktu

Preprocessing

Geometri *heat exchanger* yang disimulasikan adalah seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

Geometri dari *heat exchanger* yang telah diaplikasikan menjadi batasan dalam memvariasikan pada tahapan simulasi. Penambahan *tube* dimungkinkan hanya mencapai 6 *tube*. Meshing geometri dilakukan menggunakan type Hex/Wedge. Hasil *meshing* tampak pada Gambar 2.

Solving

Parameter fisis yang dipakai dalam simulasi *heat exchanger* berbahan tembaga berdasarkan data adalah temperatur *inlet*, kecepatan *inlet*, temperatur *tube* dan bahan *tube* berdasarkan data pengukuran. Data Pengukuran ditunjukkan oleh Gambar 3.

Tabel 1.
Parameter Fisis Simulasi *Heat exchanger* Tembaga

Parameter Fisis	Nilai
Temperatur <i>Inlet</i> (K)	299
Temperatur <i>Outlet</i> (K)	333
Waktu simulasi (menit)	11
Kecepatan <i>Inlet</i> (m ² /s)	3,6
Temperatur <i>Tube</i> Kanan (K)	357
Temperatur <i>Tube</i> Kiri (K)	346
Temperatur <i>Tube</i> Tengah (K)	351

Tabel 2.
Parameter Fisis Simulasi *Heat exchanger* Tembaga

Parameter Fisis	Nilai	
	Aluminium	Besi
Cp (J/Kg K)	871	502,48
Temperatur <i>Inlet</i> (K)	299	299
Kecepatan <i>Inlet</i> (m/s)	3,6	3,6
Temperatur <i>Tube</i> Kanan (K)	325	343,46
Temperatur <i>Tube</i> Kiri (K)	321,25	335,36
Temperatur <i>Tube</i> Tengah (K)	323,43	339,15

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai temperatur air yang keluar dari *tube heat exchanger* pada 60°C tidak mengalami perubahan yang signifikan. Nilai temperatur ini digunakan sebagai validasi simulasi CFD. Parameter fisis yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Varisi material lain, hanya dipakai bahan aluminium dan besi. Hal ini dikarenakan bahan – bahan tersebut lebih mudah ditemukan dipasaran dan memiliki nilai konduktivitas yang lebih rendah dari tembaga. Parameter fisis yang berlaku pada tembaga tidak berlaku sepenuhnya pada material lain. Temperatur *tube*, bergantung pada nilai Cp (*heat capacity*) masing – masing material. Melalui pendekatan nilai Cp, maka diperoleh nilai parameter fisis untuk material aluminium dan besi sesuai yang ditunjukkan Tabel 2.

Parameter fisis pada simulasi 4 *tube heat exchanger* tetap digunakan untuk mensimulasikan 6 *tube heat exchanger*. Temperatur yang sama menunjukkan bahwa dalam simulasi 6 *tube*, terjadi pada proses yang sama dengan 4 *tube*. Sehingga diketahui perbedaan penggunaan jumlah *tube* pada nilai temperatur yang sama.

Postprocessing

Setelah melalui tahapan *solver*, maka hasil simulasi ditampilkan secara visual dan grafik untuk mengetahui distribusi temperatur pada model simulasi.

Gambar 4 merupakan hasil dari *postprocessing* menggunakan CFD. Untuk mengetahui distribusi temperaturnya dilakukan pencuplikan secara horisontal dan vertikal. Hasilnya didapatkan nilai temperatur keluaran untuk masing – masing variasi.



Gambar 4. *Tube heat exchanger*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Efisiensi Kompor

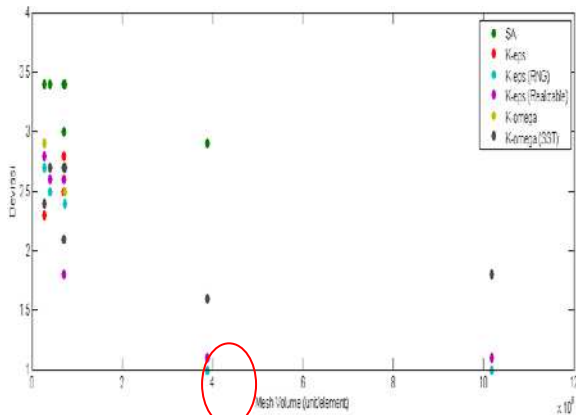
Besar kalor bahan bakar Q_b adalah 132,7625 MJ. Kalor untuk memasak Q_{s1} adalah 60,7 MJ. Kalor untuk memanaskan air Q_{s2} adalah 20,2 MJ. Efisiensi dari kompor tanpa menggunakan *heat exchanger* adalah η_{s1} adalah 45,72%. Sedangkan efisiensi kompor dengan *heat exchanger* η_{s2} adalah 60,93%. . Nilai efisiensi dengan *heat exchanger* lebih tinggi sebab panas yang terbuang dimanfaatkan oleh *heat exchanger* untuk memanaskan air didalamnya.

B. Verifikasi dan Validasi Simulasi

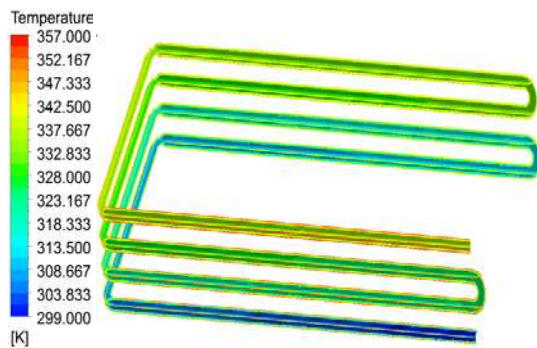
Verifikasi simulasi dilakukan dengan menggunakan *grid independence study* dan validasi dapat dilakukan dengan membanding nilai hasil simulasi dengan nilai pengukuran variabel [8]-[11]. Penelitian dari [12] telah melakukan verifikasi dan validasi simulasi CFD lewat membanding hasil simulasi dengan jumlah *grid* yang berbeda terhadap hasil pengukuran (*Grid Independence*). Penelitian dilakukan pada *heat exchanger* jenis shell and tube. Parameter yang dipakai merupakan *pressure drop*. Parameter hasil simulasi dinyatakan valid ketika nilai deviasi (selisih *pressure* hasil simulasi dengan *pressure* pengukuran) 10%. Metode ini diadaptasi pada penelitian ini, karena *heat exchanger* pada kompor dan penelitian ini masuk dalam klasifikasi yang sama yaitu *tube heat exchanger*.

Hasil verifikasi dan validasi terhadap simulasi berdasarkan nilai deviasi temperatur keluaran diplot dalam grafik pada Gambar 5.

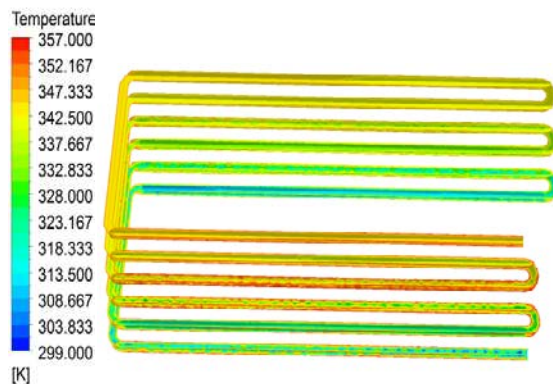
Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai deviasi simulasi hasil *grid independence* telah kurang dari 10% dari nilai pengukuran. Nilai deviasi terendah diperoleh dari pemodelan $RNG\ k - \epsilon$, untuk nilai *mesh* volume 388149 dan 1017682 dengan nilai 1,0%. Dari dua hasil yang sama ini, dipilih *grid* yang lebih rendah. Hal ini akan menyebabkan komputasi yang digunakan lebih rendah namun hasil simulasi yang didapatkan tetap sama. Dengan nilai deviasi dibawah 10% maka data simulasi yang didapatkan dapat dinyatakan valid.



Gambar 5. Perbandingan deviasi simulasi dengan mesh volume



Gambar 6. Hasil simulasi distribusi temperatur pada 4 tube



Gambar 7. Hasil simulasi distribusi temperatur pada 6 tube

C. Hasil Simulasi

Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan contoh dari hasil simulasi CFD. Distribusi temperatur yang terjadi untuk masing – masing tube pada berbagai material *heat exchanger* memiliki pola yang sama. Pola tersebut dapat dilihat dari warna tube yang ada pada gambar. Yang membedakan pola tersebut adalah skala pembacaan temperatur untuk masing – masing warna. Dari pola – pola tersebut, tube 1 memiliki panas yang lebih rendah dari tube 2, 3, 4, 5 dan 6. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur juga terjadi tiap bertambahnya tube. Hal ini sesuai dengan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Pada perpindahan panas secara konduksi dan konveksi, panjang

benda sangat mempengaruhi panas yang diterima oleh benda tersebut. Semakin panjang benda tersebut, maka semakin tinggi panas yang dihantarkan. Perbedaan material juga terlihat mempengaruhi perbedaan temperatur air yang keluar dari *heat exchanger*. Perbedaan tersebut tampak pada hasil simulasi yang telah digambarkan pada Gambar 8.

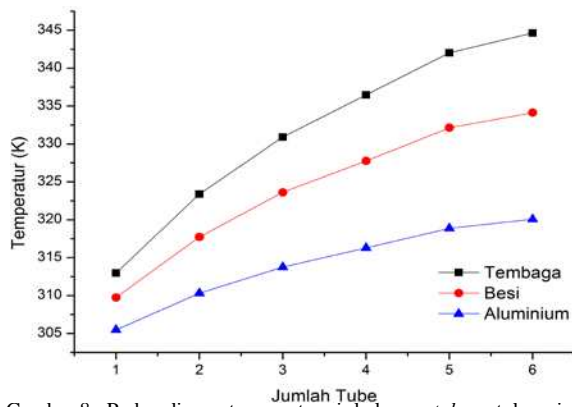
Peningkatan tidak terjadi secara merata di tiap penambahan jumlah tube. peningkatan tertinggi untuk temperatur keluaran terjadi pada jumlah tube 1. Pada material tembaga terjadi peningkatan temperatur sebesar 13,853 K. Pada material besi terjadi peningkatan temperatur sebesar 10,647 K. Pada material aluminium terjadi peningkatan temperatur sebesar 6,356 K.

Peningkatan terendah dari nilai temperatur terjadi pada jumlah tube 6. Pada material tembaga terjadi peningkatan temperatur sebesar 2,61 K. Pada material besi terjadi peningkatan temperatur sebesar 1,989 K, sedangkan pada material aluminium terjadi peningkatan temperatur sebesar 1,201 K. Variasi simulasi yang telah dilakukan juga memperlihatkan bahwa temperatur air dari 4 tube *heat exchanger* berbahan tembaga memiliki perbedaan temperatur yang sangat kecil jika dibandingkan dengan 6 tube berbahan besi. Perbedaan temperaturnya mencapai 2,338 K.

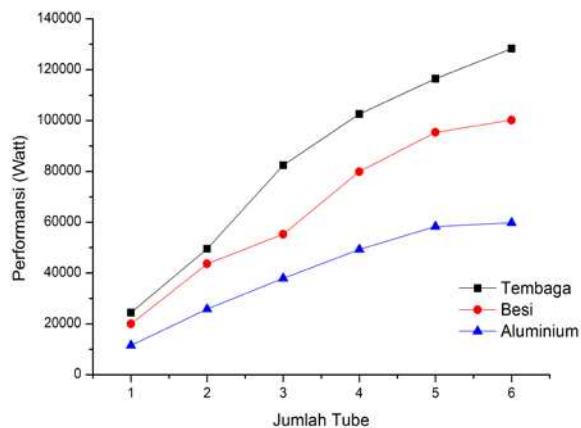
Perbedaan ini dipengaruhi oleh nilai Cp atau *Heat Capacity* masing – masing material. Nilai Cp menunjukkan seberapa banyak jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu satu satuan temperatur pada satu satuan massa. Hal ini berarti nilai Cp berbanding terbalik dengan massa dan temperatur namun berbanding lurus dengan energi yang diperoleh. Dilihat dari nilai Cp, aluminium memiliki nilai Cp tertinggi yaitu 871 J/KgK kemudian nilai Cp Besi adalah 502,48 J/KgK dan yang terendah adalah tembaga dengan nilai Cp 381 J/KgK. Dalam simulasi, nilai kalor dan massa yang diberikan untuk berbagai variasi tersebut adalah tetap. Akibat hal tersebut, perubahan terjadi hanya pada temperatur air yang mengalir dalam *heat exchanger*. Jika diurutkan dari nilai Cp, maka dengan jumlah kalor dan massa yang sama nilai temperatur tertinggi hingga terendah adalah material tembaga, besi dan aluminium. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi yang memperlihatkan bahwa nilai temperatur air keluaran dari *heat exchanger* berbahan tembaga lebih tinggi 8,649 K jika dibandingkan dengan besi dan lebih tinggi 20,209 K jika dibandingkan dengan aluminium.

Performansi *heat exchanger* dapat dihitung pada tiap – tiap tube. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, nilai temperatur pada tube kanan, kiri dan tengah tidak digunakan semua. Ts yang digunakan didapatkan dari rata – rata temperatur pada tube kanan, kiri dan tengah. Untuk nilai Overall Heat Transfer Coefficient (U) didapatkan dari CFD Post. Hasil analisa performansi tube ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 9.

Performansi *heat exchanger* berbeda untuk tiap jenis material. Perbedaan nilai performansi dari material tube tembaga dan besi lebih rendah jika dibandingkan dengan tembaga dan aluminium. Rata – rata perbedaan performansi dari tembaga dengan besi bernilai 18,228 kW sedangkan tembaga aluminium bernilai 25,3 kW.



Gambar 8. Perbandingan temperatur air keluaran tube untuk variasi material dan jumlah tube



Gambar 9. Performansi tube heat exchanger terhadap jumlah tube

Performansi 6 jumlah tube dengan material besi mampu menyamai performansi dari 4 jumlah tube dengan material tembaga. Hal ini berarti, jika diaplikasikan maka dengan menggunakan 6 jumlah tube besi akan didapatkan nilai temperatur air yang sama dengan 4 tube tembaga yang ada saat ini. *Payback period* didapatkan dari ratio total investasi dengan keuntungan per tahun. Hasil analisa biaya usaha memperlihatkan bahwa *payback period* untuk 4 tube tembaga adalah 12,4 bulan sedangkan untuk 6 tube besi *payback period*-nya 8,13 bulan. Perbedaan *payback period* yang sangat jauh hingga mencapai 4,22 bulan disebabkan karena nilai investasi untuk pembelian material dan pabrikan *heat exchanger* tembaga lebih mahal dibandingkan investasi untuk pembelian material dan pabrikan besi. Nilai perbedaan investasi tersebut mencapai 2,5 juta rupiah.

IV. KESIMPULAN

Pengaruh perbedaan material dan jumlah tube pada tube *heat exchanger* sesuai hasil penelitian adalah

- Efisiensi kompor setelah menggunakan tube *heat exchanger* meningkat menjadi 60,93% dari efisiensi kompor awal tanpa *heat exchanger* yang hanya 45,72%
- Nilai terendah temperatur air keluar dari *heat exchanger* diperoleh dari simulasi jumlah tube 1 berbahan aluminium sebesar 305,48 K. Nilai tertinggi temperatur air keluar dari

heat exchanger diperoleh dari simulasi jumlah tube 6 berbahan tembaga sebesar 344,632 K

- Nilai performansi terendah diperoleh dari simulasi jumlah tube 1 berbahan aluminium dengan nilai performansi 1152,64 Watt. Nilai performansi tertinggi diperoleh dari simulasi jumlah tube 6 berbahan tembaga dengan nilai performansi 128290,6 Watt
- Penggunaan 4 tube tembaga pada aplikasi dapat digantikan dengan penggunaan 6 tube besi karena nilai performansinya hanya berbeda sebesar 2395,188 Watt dan nilai temperatur keluaran hanya berbeda 2,338 K.
- Investasi terhadap 6 tube besi lebih rendah dibandingkan dengan 4 tube tembaga senilai Rp 4.335.866,00 dan perbedaan nilai *payback period* hingga 4,22 bulan.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih sebesar – besarnya disampaikan kepada Bapak Madekan, di Mejoyo Surabaya atas bantuannya dalam proses pengambilan data *Heat exchanger*.

DAFTAR PUSTAKA

- Henk Huisseune, Christophe T'Joel, Peter De Jaeger, Bernd Aemeel, Sven De Schampheleire, Michel De Paepe. 2013. "Performance analysis of a compound *heat exchanger* by screening its design parameters" Elsevier Science Inc. Applied Thermal Engineering 51 : 490-501.
- X. Zhang, D.K. Tafti. 2003. "Flow efficiency in multi-louvered fins" Elsevier Science Inc. Int. J. Heat Mass Transfer 46 : 1737-1750.
- Baldwin, S.F., 2005. Principle Desain Wood Burner
- Joshua Aigenbroad, Morgan DeFoort, Allan Kirkpatrick, Cory Kreutzer. 2011 "A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves-Part 1 : Setup and baseline validation" Elsevier Science Inc : 160-168.
- Incropera, Franck P. dan DeWitt, David P. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc
- Bartlett, Dean A. 1996. "The Fundamentals of *Heat exchangers*" The Industrial Physics. American Institute of Physics. 18-21.
- S.R.A. Rashid, U.K.Ibrahim, S.M.Alauddin, "Retrofit Design of *Heat exchanger* Network (HEN) on Synthesis and Purification Unit of Methanol Plant," IEEE CHUSER Desember 5-6 2011, Penang
- Warsi, Z.U.A. 1998. Fluid Dynamics, Theoretical and Computational Approaches Second Edition. CRC Press.
- Bardina J.E., Huang P.G., dan Coakley T.J. 1997. NASA Technical Memorandum 110446 : Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development. California : NASA.
- Coussirat M., Guardo A., Jou E., Egusquiza E., Cuerva E., Alavedra P. "Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated facades". Elsevier Science Inc. Energy and Buildings 40 (2008) 1781–1789
- Wang Q., Chen Q., Chen G., Zeng M. 2009. "Numerical investigation on combined multiple shell-pass shell-and-tube *heat exchanger* with continuous helical baffles". Elsevier Science Inc. International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (2): 1214 – 1222.
- Vimal Kumar, Supreet Saini, Manish Sharma, K.D.P. Nigam. 2006. "Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger" Elsevier Science Inc. Chemical Engineering Science : 4403-4416.